Energy, Mines and Resources Canada | Énergie, Mines et Ressources Canada

CANMET
Canada Centre for Mineral and Energy Technology | Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

LE RENDEMENT THERMIQUE RÉEL DE 30 CUBILOTS

R.D. WARDA, E.F. DARKE et H.P. GUINDON
SECTION DE LA FONDERIE

AOÛT, 1982

This document is an unedited interim report prepared primarily for discussion and internal reporting purposes. It does not represent the final opinion of the Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET)

Ce document est un rapport provisoire non-révisé et rédigé principalement pour fins de discussion et de documentation interne. Il ne représente nullement l'opinion définitive de l'administration du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET)

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LES MINÉRAUX

58pp

LABORATOIRES DE RECHERCHE EN MÉTALLURGIE PHYSIQUE
RAPPORT MRP/LRMP 82-56F(TR)

Laboratoires de recherche en métallurgie physique

Rapport MRP/LRMP 82-56F (TR)

LE RENDEMENT THERMIQUE RÉEL DE 30 CUBILOTS

par

R.D. Warda[1], E.F. Darke**, H.P. Guindon**

RÉSUMÉ

Les techniques opératoires et les rendements de fusion des cubilots de fonderies furent évalués sur les lieux. Ces évaluations, pouvant durer jusqu'à deux jours, ont résulté en un ensemble de données pour chaque cubilot lors de son fonctionnement usuel. Ces données se regroupent comme suit: la conception et les dimensions du cubilot; les techniques de piquage et de décrassage; le poids, la grosseur et la composition des constituants de la charge; la température, l'humidité, la teneur en oxygène et la vélocité du vent; la température et la composition des gaz de la cheminée; la

---

1. Chercheur scientifique ** techniciens en recherche, Laboratoires de recherche en métallurgie physique, CANMET, Energie, Mines et Ressources, Canada.

couleur, la texture et la composition de la scorie; le taux de fusion, la température, la composition et les caractéristiques de trempe de la fonte au bec de coulée.Les produits et les bilans thermiques qui avaient été modifiés pour considérer les conditions opératoires fluctuantes durant la coulée, ont permis l'analyse et la corrélation des données. Pour chaque cubilot, on a précisé la distribution de l'apport calorifique entre les différents produits, soit la fonte, le laitier, les gaz d'échappement, la paroi ausi que toutes les autres pertes. Dans la plupart des cas, le rendement thermique réel obtenu pour chaque cubilot était très différent du rendement déterminé à l'aide du bilan calorifique à l'équilibre et des rapports de charge métal:coke. Les rendements de fusion furent normalisés afin de comparer les cubilots et d'établir une corrélation entre leur fonctionnement, leur conception et leurs techniques opératoires. Nous avons aussi considéré le rendement de fusion du cubilot en milieu de fonderie. Le rendement de fusion fut en autre considéré dans le contexte de la fonderie où se trouve chaque cubilot; le rendement de fusion global fut comparé avec la performance du cubilot, en plus d'avec les variables de la fonderie, qui sont étrangères au cubilot. Les coûts de coke furent déterminés selon la quantité de fonte produite au bec de coulée et le nombre de pièces coulées expédiées. Plusieurs façons d'épargner du coke furent remarquées et leurs possibilités évaluées. Ce apport présente plusieurs exemples de fonderies qui ont accepté de modifier la conception et la technique de leur cubilot afin d'améliorer le rendement et de diminuer les coûts.

INTRODUCTION

"Si l'on considère les prix exorbitants du coke, il peut paraître superflu de faire des suggestions ou des commentaires, mais quiconque utilise fréquemment un cubilot sait que la majorité des fonderies n'accordent que peu d'attention à ce facteur vital. Il n'y a aucune économie à lésiner sur la consommation de coke si de la fonte surchauffée au bec de coulée est requise à cause des propriétés des pièces coulées, de la distance que la fonte liquide doit parcourir ou du fait que la fonte doit être traitée à plusieurs reprises."

C'est en 1920 que Pat Dwyer écrivait ces mots dans un article de la revue "Foundry" qui traitait du rendement de la fusion des cubilots (1).* Tous ceux qui ont lu Pat Dwyer connaissent son pouvais d'évaluer les fondeurs et leurs fours soit dans par articles, soit à travers le personnage de "Bill", vieux fondeur phylosophe. Ils ne seraient pas surpris s'il avait ajouté: "et tant qu'il y aura des fondeurs et des cubilots, on ne cessera d'avoir des désaccords sur la meilleu façon d'améliorer le rendement de la fusion". C'est bien vrai, aujourd'hui, le coût du coke, les lois sur la pollution, les lois sur la pollution, les changements dans le marché et la compétition que représentent les fours électriques augmentent, dans des délais très courts, le rendement de leur cubilot. Mais comme le disait Dwyer, diminuer la quantité de coke n'est pas la seule solution pour économiser sur les coûts de la fusion. Deux solutions

---

* Vous trouverez cette référence et plusieurs autres dans "Soixante ans de documentation sur les cubilots" (29).

de la fusion du cubilot et la seconde est d'améliorer le rendement global du cubilot dans son milieu qui est la fonderie elle-même. Si le fondeur s'efforce d'améliorer ces deux points, il maximisera le rendement réel de la fusion dans son opération et minimisera ses coûts réels d'énergie.

CANMET s'est donné comme mandat d'aider les fondeurs canadien dans leurs efforts pour devenir plus productifs et pour bien utiliser l'énergie. Afin d'atteindre ce but, nous avons mené, dans 30 fonderies canadiennes, une étude du rendement de la fusion de leurs cubilots à l'aide d'essais de synthèse en usine. Une étude précédente[2] des émissions des cubilots caractérisées et comparées aux techniques opératoires fut le tremplin et le modèle de cette étude. Dans cette enquête, notre objectif est double: (1) déterminer dans des conditions normales de fonderie le rendement de la fusion de chaque cubilot séparement et dans le contexte de ses opérations dans la fonderie; et (2) comparer ces rendements, non seulement à la conception et aux techniques opératoires du cubilot, mais aussi aux contraintes imposées par le fonctionnement de la fonderie. Notre proposition d'enquête a reçu une réaction très favorable de la plupart des opérateurs de cubilot. Nous pouvons vous présenter les résultats de l'évaluation des rendements de 30 cubilots. En plus, nous aimerions vous présente la réaction de plusieurs des fonderies participant a cette enquête, lors de la modification de leur technique pour réduire les pertes de chaleur trop élevées et augmenter le rendement de la fusion tout en gardant ou enaméliorant la qualité du métal.

Méthodologie

Le projet a débuté par une enquête téléphonique visant à expliquer notre objectif, à déterminer si les fonderies étaient intéressées à participer à un tel projet et às'assurer que les 30 fonderies choisies représenteraient une diversité intéressante de dimensions, de conceptions, de techniques opérationnelles et d'exigences du marché pour le métal. Ces données furent inclues par la suite, dans les informations accumulées durant les essais en usine afin de comparer ce que les fonderies croyaient obtenir et ce qu'elles obtenaient en réalité.

La schéma de la figure 1 résume tous les critères utilisés pour caractériser le cubilot et ses opérations, et pour évaluer son rendement. Ces critères se divisent par la suite en groupes, soit:

1 - les dimensions du cubilot et les caractéristiques de la conception;

2 - les entrées: le vent, le coke, les métaux d'apport, le fondant et les alliages;

3 - les sorties: le métal, la scorie, les gaz d'échappement et les chutes;

4 - les caractéristiques opérationnelles: la flamme à la porte de chargement, la couleur et la texture de la scorie, les techniques de préparation du lit, la hauteur du lit et la charge durant l'opération.

L'appendice "A" décrit les détails de la méthodologie avec des commentaires sur la fusion et le calcul des charges.

RÈSULTATS

Ce rapport contient un résumé de résultats de plus de 60 jours d'essais au cubilot et plusieurs exemples de comportement de cubilots choisis. Afin d'identifier les nombreuses variables déterminant le rendement de la fusion dans une fonderie, le tableau 1 nous présente des données sous la forme d'une série de système de fusion. Le premier système se consacre au seul cubilot afin de comparer sa marche à sa conception et à ses techniques opérationnelles. Le deuxième système considère aussi le cubilot, mais, il tient compte des variables du milieu, telles les pertes de coke et la durée de la fusion. Le troisième englobe toute la fonderie, en plus des variables des deux autres systèmes, il identifie l'importance du rendement lors de la détermination de la marche globale de la fusion. L'appendice B présente les données décrivant la conception et l'opération de chacun des 30 cubilots mis à l'essai, leurs scories représentatives et les caractéristiques de la fonte qu'ils produisent. Afin de comparer les cubilots du même genre ou de différentes marches de fusion, les cubilots sont classifiés selon le rendement normalisé de la fusion.

Rendement de la fusion du cubilot

Cette partie nous présente les rapports coke:métal, les résultats du rendement des fusions et plusieurs exemples de la composition des gaz d'échappement et de la température de la fonte. L'utilisation de ces données avec l'appendice "B" détermine le rendement du cubilot et la corrélation entre rendement, la conception et l'opération du cubilot.

Le rendement du cubilot est décrit et classé dans trois contextes au tableau 2 en utilisant les rapports métal:coke et les rendements de fusion. La rapport nominal métal:coke est la base de la classification dans le premier contexte. Ce chiffre de classification sera utilisé continuellement dans notre rapport comme le numéro du cubilot. (Le rapport nominal métal:coke est le rapport de la charge que le personnel de la fonderie a donné lors du contact par téléphone et il fut confirmé lors de notre visite). Vous pourrez noter que dans deux cas la lettre A fut utilisé ainsi vous remarquerez les numéros 15 et 15 A qui représentent deux cubilots à la même fonderie et les numéros (10) et (10 A) qui représentent un seul cubilot que nous avons testé deux fois afin d'étudier les effets de changements de conception et de techniques opérationnelles.

Dans le deuxième cas, les rendements de fusion actuels et les rapports métal:coke sont identifiés pour des conditions journalières mesurées à chaque cubilot. Le rendement de la fusion est la chaleur utile à la sortie du cubilot telle la fonte liquide au bec de coulée, exprimée en pourcentage de l'apport calorifique total. Cet apport calorifique inclut le potentiel de chaleur du coke, la chaleur sensible du vent, la chaleur d'oxydation du silicium et la chaleur de formation du laitier. Le rapport de coke actuel est le rapport du métal fondu par rapport à la quantité nette de coke consommée durant une journée d'opération. Le calcul de cette quantité nette de coke consommée considère le coke brûlé, la perte de particules fines dans les gaz d'échappement, la quantité nécessaire pour

décomposer l'humidité du vent et le coke dissout dans le métal sous forme de carbone. Cette quantité nette de coke considère aussi les chutes journalières à la fin de la fusion en les soustrayant du lit de coke total, de la charge et du coke d'appoint. Comme dans le cas de la première comparaison qui est effectué en se basant sur les rapports de coke nominaux, les cubilots sont classifiés selon leurs rendements de fusion actuels et leurs rapports de coke.

Même si les rendements actuels et les rapports de coke décrivent avec précision le rendement de chaque cubilot, les différences entre chaque cubilot sont trop grandes pour obtenir une comparaison significative. Afin de donner une signification à ces données, nous les avons normalisées pour éliminer l'influence de la température du métal, des conditions de vent et du gain en carbone sur le rendement de la fusion et le rapport coke:métal. Dans un premier temps, nous avons normalisé les températures du métal à 1480°C (2700°F) en utilisant les données de l'AFS et de la BCIRA (4,5) pour définir la corrélation entre la température du métal et le rendement de la fusion tel que montré à la figure 2. Dans ce graphique, chaque courbe fut créé en modifiant le rapport coke:métal et/ou la vélocité du vent d'un cubilot pour la comparer à celle d'un autre cubilot semblable. Si nous utilisions de la même façon les données accumulées lors de nos essais sur les 30 cubilots, nous obtiendrions probablement des courbes semblables en comparant le rendement et la température. A la figure 3, nous avons superposé un groupe de courbes à la courbe moyenne des

courbes de la figure 2, fournies par l'AFS et le BCIRA. Cette courbe moyenne est celle du centre. Les points à l'intérieur du groupe de courbes représentent le rendement de chaque cubilot, basé sur le rapport rendement-température; le rendement fut ensuite normalisé en déplaçant le points parallèle aux courbes afin de déterminer un nouveau rendement pour une température au bec de coulée de 1480°C (2700°F). Pour normaliser le rendement du cubilot, nous avons complété en recalculant les bilans matériau-chaleur pour obtenir des rendements de fusion et des rapports coke: métal dans le deuxième tableau basés sur les conditions suivantes:

1 - une température de 1480°C (2700°F) au bec de coulée
2 - un vent à une température de 21°C (70°F) et 50% d'humidité relative
3 - un apport calorifique total fourni par le coke de 96,3%*
4 - aucun gain en carbone
5 - une perte de la charge de coke dans les gaz d'échappement de 2% (poussière de coke).

Bien que la moyenne de plusieurs mesures soit nécessaire pour satisfaire les besoins de déterminer si le cubilot fonctionne bien, il est indispensable que certaines des

---

* Le reste de l'apport calorifique fut fourni par la chaleur sensible du vent, l'oxydation du silicium et la chaleur de formation du laitier.

variables de l'opération du cubilot soient détaillées et précises. Les courbes des figures 4 à 6 montrent bien le niveau de gaz CO_2 dans la cheminée et la température de la fonte au bec de coulée de trois différents cubilots. La figure 4 montre le comportement typique d'une fusion instable de plusieurs cubilots opérant pour de courtes durées chaque jour. Si l'on considère que les conditions du vent demeurent constantes, l'augmentation de la courbe en CO_2 indique que le hauteur du lit diminue à mesure que la fusion progresse. A un certain moment critique, lequel varie d'un cubilot à l'autre, la température de la fonte diminue, la profondeur de trempe augmente et la scorie devient noire et poreuse. A la figure 5, un comportement instable semblable est noté pour un cubilot plus gros. Cependant, dû au fait que la hauteur minimum critique du lit ne fut pas atteinte, cette tendance s'est avérée plus lente et les conditions du métal et du laitier n'ont changé que légèrement. La figure 6 montre un comportement instable dans le cubilot dont la teneur en gas CO_2 a diminué, ce qui s'avère l'inverse de la tendance démontrée aux figures 4 et 5.

Ceci est le résultat d'une augmentation de la hauteur du lit lors d'additions de coke d'appoint non nécessaires.

Le département de la fusion

Dans ce chapitre, la définition du rendement du département de la fusion est basée sur les rendements de la fusion, les rapports coke:métal et le coût du coke par tonne pour chaque

fonderie. Plusieurs autres résultats indiquent l'influence sur le département de la fusion des variables de fonderie suivantes: l'élimination des chutes de coke, les pertes de coke lors de sa manutention, le temps de fusion et les pertes de température lors du transport de la fonte liquide.

Le tableau 3 décrit et classe le fonctionnement actuel de chaque département de fusion. Les trois critères de rendement et leurs définitions s'énoncent comme suit: le rendement de la fusion est la chaleur contenue dans le métal au bec de coulée, incluant la chaleur contenue dans les pertes de coke durant sa manutention et la chaleur accumulée dans les chutes. Cette teneur est exprimée en pourcentage de l'apport calorifique total; le rapport métal:coke est le poids de métal fusionné, divisé par la somme des charges de coke consommées, plus les pertes de coke de la manutention et les chutes. Le coût du coke est le prix d'achat du coke (232.00 $/tonne métrique ou 210.00$/tonne anglaise), plus les frais de transport divisé par le rapport métal-coke global. Il est à noter que nous avons estimé à 10% les pertes de la manutention, soit la différence entre le poids de coke acheté et le poids de coke chargé dans le cubilot.

Lorsque nous évaluons le département de la fusion, nous devons comparer, en tout premier lieu, le rendement du département a celui du cubilot. La figure 7 nous montre cette comparaison. Elle exprime la corrélation en pourcentage entre le rapport de coke actuel du cubilot, et celui du département de fusion. Nous pouvons remarquer lavariation de cette corrélation

selon la durée de la fusion. Le tableau 4 inclut la distribution de la fonte liquide aux moules dans le rendement global de la fusion. Ce tableau décrit les conditions actuelles pour les fonderies 6 et 24 (cas A et D): la température de la fonte au bec de coulée, au bec de la poche et au moule. Les données sur le rendement de la fusion du cubilot et du département de la fusion sont puisées dans les tableaux 2 et 3 respectivement. Tel que défini au tableau 3, le rendement de la fusion au moule est la quantité de chaleur totale contenue dans la fonte liquide au moule, représentée comme étant le pourcentage de l'apport calorifique total entrant dans le cubilot. Dans le cas des situations hypothétiques B et E, les pertes de chaleur excessives de la poche, soit 170°C (338°F) furent réduites à 100°C (212°F) et 90°C (194°F), il en résulta des températures plus élevées à la poche de coulée que ce que l'on désirait. Nous pouvons éliminer facilement cet excès de surchauffage en ajoutant de la ferraille à la poche ou en réduisant la température au bec de coulée du cubilot. L'étude des cas B et E révèle l'effet sur le rendement de la fusion et l'économie de coke lorsque le métal est refroidi avec de la ferraille. Pour ce qui est des cas C et F, nous pouvons remarquer les avantages que présentent le changement de la marche du cubilot afin de réduire la température du métal au bec de coulée.

Rendement global de la fonderie

Le tableau 3 représente le rendement de fusion d'une situation hypothétique d'un rendement de 67%, soit le poids de fonte au bec de coulée comparativement au poids de pièces coulées expédiées. Le rendement global de la fusion, le taux de coke et son coût pour chaque fonderie est le résultat de l'utilisation du facteur de rendement sur le rendement respectif, le taux de coke et son coût afin de définir le rendement du département de la fusion pour cette fonderie.

DISCUSSION

Lorsque l'on étudie les rendements nominaux, actuels et normalisés de la fusion et les rapports métal:coke de la figure 2, nous pouvons remarquer certains points prédominants du comportement du cubilot. Les rapports nominaux débutent avec un fabuleux 15,4:1 et décroissent jusqu'a 5,5:1 et 3,8:1 pour deux cubilots qui utilisent du petit coke de haut-fourneau. Lorsque quelqu'un vous avoue avoir un rapport nominal de 15:1, sans pouvoir donner d'explications lors de réunions de fondeurs familliers avec le cubilot, afin d'entraîner une admiration non méritée, cela crée souvent un froid parmi le groupe et possiblement de graves problèmes pour les opérateurs de cubilots. Malheureusement, le rapport nominal métal:coke est très différent du rendement actuel du cubilot et encore plus du rendement global de la fusion.

Les rapports actuels métal:coke, basés sur les entrées et les sorties du cubilot sont considérablement plus bas que les

rapports nominaux correspondants. En plus, la diminution des rapports de coke a changé de beaucoup la classification des fonderies. Un exemple frappant est le cubilot no 1, qui possède le meilleur rapport nominal, et qui s'est classé 29e parmi les rapports actuels. La raison principale est le comportement instable de la fusion où le taux de chagement du coke n'égale pas le taux de consommation du lit de coke, ce qui entraîne une variation de la hauteur du lit, comme vous pouvez le constater aux figures 4-6, et les caractéristiques de la fonte et du laitier varient tout au long de la fusion. La figure 4 nous fait voir des changements rapides dans le cubilot no 1; il en résulta une différence énorme entre le rapport nominal 15,4:1 et le rapport actuel 4,7:1. Dans ce cubilot, la fusion qui dura 65 minutes, a consommé un lit de coke de 570kg (1250lbs) en plus du coke des charges. Les cubilots qui ont montré un comportement semblable ont démontré un gaspillage de deux façons: d'une façon directe, avec une hauteur de lit de coke d'amorçage beaucoup trop élevée et d'une façon indirecte en augmentant la quantité de rebus vers la fin de la fusion car le lit fusion était trop bas, ce qui modifiait la température et la trempe. Nous pouvons remarquer, à la figure 5, le comportement du cubilot lorsque la hauteur initiale du lit est beaucoup trop élevée et qu'elle diminue tout au long de la fusion. Suite à plusieurs calculs, à l'aide d'un bilan calorifique modifié, il s'est avéré que ce cubilot gaspillait 1800 kg (4000 lbs) de coke par jour, et la plus grande quantité de chaleur s'échappait dans les gaz de la cheminée sous forme de chaleur latente. La figure 6 nous

illustre une tendance inverse au comportement du cubilot présenté à la figure 5 mais, il en résulta aussi un gaspillage de coke. Dans ce cubilot qui produisait, au début, une fonte très satisfaisante, on fit monter la hauteur du lit par l'addition de charges de coke d'appoint, ce qui entraîna une diminution du rendement de la fusion.

A la figure 2, les rendements actuels de la fusion et la chaleur de sortie du cubilot définissent mieux le rendement de chaque cubilot que le rapport métal:coke car le bilan calorifique tient compte de beaucoup plus de variables. Cependant, comme le disait Pat Dwyer lorsqu'il commentait les résultats de sa revue des cubilots [6]: "...il est remarquable de constater l'inconsistance générale des opérations dans tous ces cubilots." Donc, pour ne pas comparer "des pommes, des oranges et du coke"[7], nous avons normalisé les résultats obtenus sur le rendement des cubilots.

La première étape pour normaliser ces résultats fut de déterminer la corrélation entre le rendement de la fusion et la température du métal. La figure 2 nous en montre une représentation graphique. En plus de démontrer le fait depuis longtemps bien connu que le cubilot est une super-fournaise très inefficace (8,9,10), cette figure indique l'importance de la température du métal pour déterminer le rendement de la fusion. Nous pouvons démontrer que les pentes des courbes entre 1430°C (2600°F) et 1540°C (2800°F) correspondent aux variations de rendement de surchauffage de 3,5 à 5,0 pour cent. C'est donc

dire qu'une modification du rendement de surchauffage, si basse soit-elle, démontre une variation significative de la température du métal au bec de coulée. Nous pouvons donc affirmer que la température du métal au bec de coulée représente le meilleur moyen de contrôle pour améliorer le rendement de la fusion. Citons un exemple: nous avons un cubilot moyen qui produit de la fonte à une température de 1540°C (2800°F), donc un rendement de 25 à 30%; si nous modifions les conditions de ce cubilot pour obtenir une fonte à 1450°C (2650°F), nous augmenterons son efficacité de 43 à 50%. Le résultat est fort simple: une économie de coke de 20.00$ la tonne métrique (18.00$/tonne) de métal, soit 320.00$/jour pour un cubilot produisant 4 tonnes/heure et opérant 4 heures par jour.

Afin de compléter les courbes de normalisation des températures, nous avons apposé les résultats aux courbes produites par l'AFS et la BCIRA. Cette compilation des résultats a entraîné la formation de trois groupes. La figure 8 nous les illustre. En premier lieu, un groupe moyen a englobé les résultats de l'AFS et de la BCIRA, ainsi que la majeure partie des résultats obtenus pour des températures au-dessus de 1480°C (2700°F), lors de notre révision des cubilots. En second lieu, l'étude de deux des cubilots a démontré une efficacité considérable, comparativement aux autres. Finalement, à des températures au dessous de 1480°C (2700°F), les résultats de la révision ont illustré, dans un groupe dont la tendance diffère, le rendement médiocre de certains cubilots.

Le résultat de ce troisième groupe suggère que cette température basse au bec de coulée n'était pas intentionnelle pour améliorer le rendement du cubilot en modifiant leurs techniques opérationnelles. Bien au contraire, elle signifie des températures basses et des rendements médiocres qui découlent d'un mauvais fonctionnement du cubilot. La figure 8 illustre bien les avantages d'améliorer le mauvais fonctionnement d'un cubilot. Les cas 1 à 6 de cette figure sont le produit de la modification des données actuelles pour montrer comment la marche des trois groupes de cubilot affectait leurs rendement, leur rapports métal:coke et leur coût en coke. Une économie de 26 à 31$ la tonne métrique (24 à 28$/tonne) peut être réalisée pour des cubilots dont le fonctionnement laisse à désirer.

Le procédé de normalisation fut complété en élaborant les effets des procédés réagissant avec le coke dans le cubilot, comme la décomposition de l'humidité dans le vent, les fumées de coke dans les gaz d'échappement et le carbone en solution dans la fonte. Il en résulta que les "rendements de la fusion normalisés" et les "rapports de coke" du tableau 2 représentent les critères les plus précis du fonctionnement absolu et relatif du cubilot. Nous les utilisons pour classifier les données sur le cubilot de l'appendice "B" pour rendre valable la comparaison entre les cubilots et identifier les concepts et les variables opérationnelles affectant la marche du cubilot.

Suite à la description de la marche de chaque cubilot et à la démonstration de l'économie substantielle de coke par

l'amélioration de cette marche, nous allons examiner le rendement du département de la fusion et sa corrélation avec les variables étrangères au cubilot. Le tableau 3 décrit la marche du département de la fusion en se basant sur du coke acheté pour l'entrée et sur la fonte au bec de coulée pour la sortie. Les différences notables et variées entre la marche de la fusion du cubilot, décrites au tableau 2, et la marche du département de la fusion, décrite au tableau 3, s'expliquent par les pertes de coke dans la fonderie lors de sa manutention, par les pertes de coke dans les chutes et par la durée de la fusion.

La figure 7 résume l'influence des pertes de coke et de la durée de la fusion sur la corrélation entre les rapports de coke du cubilot et du département de la fusion. L'étude de cette figure révèle plusieurs points importants de cette corrélation. Premièrement, à cause des pertes de coke de 10% lors de sa manutention, le rapport de coke maximal du département de la fusion est de 90% du rapport de coke du cubilot. En deuxième lieu, lorsque nous incluons les pertes de coke dans les chutes, le rapport de coke du département de la fusion fait plus que décroître car il devient très sensible à des durées de fusion de moins de 5 heures. Enfin, lorsque nous additionnons l'inconsistance des durées de fusion et des différentes quantités de chutes de coke aux différences existant entre les fonctionnements de la fusion des cubilots, nous réalisons que nous obtenons un facteur quadruplé pour ce qui est de la marche du département de la fusion et des coûts de coke.

Les effets pratiques de l'influence des pertes de coke et de la durée de la fusion sur la marche du département de la fusion sont les suivants:

1) une augmentation de la durée de fusion journalière de 1 à 4 heures entraînera généralement une augmentation du rendement de la fusion de 20 à 30% et une réduction de coût de coke correspondante.
2) une augmentation supplémentaire du rendement et d'économie de coke peut être réalisée en minimisant les pertes lors de la manutention du coke et en améliorant la récupération du lit de coke.

Considérons que nous incluons dans le rendement du département de la fusion le transport de la fonte liquide aux moules. Nous remarquerons que la baisse de température durant cette opération représente une raison majeure pour diminuer le rendement(14). Le tableau 4 illustre comment de trop grandes baisses de la température de la fonte dans la poche de coulée entraîneront un rendement faible du cubilot et du département de la fusion. C'est donc dire qu'une diminution des pertes de chaleur lors du transport à un niveau normal et que l'addition de ferrailles dans la poche de coulée pour diminuer le surchauffage n'entraîneront aucune augmentation du rendement de cubilot, mais une légère augmentation du rendement du département de la fusion et une diminution négligeable de la consommation de coke. Cependant, il est à noter que lorsqu'on diminue la température au bec de coulée, à cause de pertes moins

élevées lors du transport, nous remarquons une augmentation significative du rendement du cubilot et du département de fusion et une économie substantielle de frais journaliers en coke.

Après une étude des résultats obtenus dans 30 fonderies sur la marche du cubilot et la marche de la fusion, en général, nous avons remarqué en général des variations surprenantes entre les rendements de la fusion, les rapports de coke et les coûts du coke. C'est donc dire qu'il y a place pour l'amélioration des rendements et des dépenses en coke. Afin d'améliorer les techniques opérationnelles, le tableau 5, qui résume l'appendice "B" et les caractéristiques moyennes des 10 meilleurs cubilots, et des10 cubilots, les plus médiocres, sera utilisé avec les données présentées auparavant pour définir les qualités d'un cubilot "idéal". Pour acquérir un rendement maximal, le cubilot devrait posséder les caractéristiques opérationnelles et la conception suivante:

1) le diamètre de la zone de fusion le plus grandpermis par la paroi et les exigences deproduction;
2) une distance d'au moins 6 m (20') entre les tuyères et la porte de chargement;
3) des conduites à vent divisées munies de dispositifs d'enrichissement et de chauffage;
4) un garnissage réfractaire compatible avec les autres besoins;

5) lorsque le cubilot est sans garnissage, une hauteur minimum refroidie à l'eau est nécessaire;

6) les tuyères devraient être le plus bas possible selon la méthode de piquage et le gain en carbone désiré;

7) le plein contrôle du vent et toutes les charges pesées;

8) la lecture régulière ou continue de la température du métal;

9) la mesure régulière ou continue de la teneur en CO_2 dans les gaz d'échappement;

10) la mesure régulière de la profondeur de trempe et/ou l'analyse de la teneur en carbone équivalent;

11) l'analyse de la flamme à la porte de chargement et des caractéristiques de la scorie pour évaluer la marche de la fusion;

12) des taux de fusion spécifiques de 7,4 à 9,8 tonnes/m^2/h (0,75 à 1,0 tonne/pi^2/h)*;

13) une vitesse de vent spécifique consistente avec (12), mais préférablement de 92 à 122 Nm^3/m^2 (300 à 400 SCFM/pi^2)*;

14) la modification des conditions du cubilot pour produire de la fonte à une température minimale au bec de coulée, consistante avec les besoins de la fonderie;

15) la détermination de la pesanteur du lit et des charges de coke afin de garder des conditions de fusion stables avec une hauteur de lit minimale selon (14); et

16) l'utilisation adéquate de fondant afin de faciliter la combustion et le gain en carbone.

Pour que le rendement du département de la fusion soit maximal, la fonderie "idéale" devrait fournir les conditions opérationnelles suivantes:

1) un rendement de la fusion du cubilot optimal tel que défini plus haut;

3) la récupération maximale des chutes de coke,

4) des pertes minimales lors de la manutention du coke;

5) des pertes de température minimales lors du transport de la fonte liquide; et

6) un rendement maximal dans la fonderie.

La liste des caractéristiques qui précèdent, pour un cubilot ou une fonderie "Idéal" est loin d'être complète car elle est basée sur des remarques observées lors de notre visite des trente cubilots, sur le fonctionnement, la conception et l'opération. Elle n'inclut aucun moyen pour améliorer le rendement de la fusion comme:

1) la récupération du vent chaud;

2) l'injection d'oxygène au lieu de l'enrichissement;

---

* La superficie mentionnée aux numéros (12) et (13) représente la section transversale du cubilot dans la zone de fusion.

3) l'augmentation de la vélocité du vent;

4) l'utilisation du carbure de calcium;

5) l'injection de poussière de coke dans les tuyères.

En plus de cela, sauf pour les deux fonderies quiutilisent du coke de haut-fourneau de -5 cm + 2 cm (-2 pouces +1 pouce) le coke ne fut pas considéré comme jouant un rôle important pour la comparaison entre les cubilots car toutes les autres fonderies utilisaient du coke de fonderie de 8 à 20 cm (3 à 8 pouces).

Ces listes ne sont pas infaillibles car chaque suggestion est valable mais ne représente pas nécessairement une condition suffisante pour obtenir un fonctionnement optimal. Par exemple, il est recommandé d'utiliser une cheminée élevée afin de diminuer les pertes de chaleur sensible dans les gaz d'échappement. Le tableau 5 et la figure 9 montrent que ce point de vue est généralement exact mais l'étude de la figure 9 révèle des résultats très dispersés, indiquant ainsi que plusieurs autres variables affectent la température des gaz de la cheminée. C'est bien connu que la dimension de la ferraille utilisée affecte la température des gaz d'échappement et du métal[14]. Dans plusieurs fonderies, nous avons remarqué que la température des gaz de la cheminée était élevée et que de sérieux canaux se formaient dans les cubilots suite à une mauvaise distribution de la charge. En dernier lieu, nous ne pouvons oublier l'élément humain. A la fonderie no 23, une technique de charge irrégulière a entraîné le niveau de la charge à fluctuer jusqu'à 3 m (10'). Naturellement cette

situation a entraîné la réaction de la figure 9, la température des gaz de la cheminée variait de 425°C (800°F) 870°C (1600°F) et les pertes de chaleur sensible variaient entre 12 et 25% de l'apport calorifique total.

Pour le fondeur qui essaie d'améliorer le rendement de son cubilot, certaines de ces suggestions peuvent sembler superflues. Augmenter la hauteur du cubilot ou abaisser les tuyères peut ne pas être réalisable, ou installer un système à vent chaud sur un petit cubilot qui fonctionne une ou deux heures par jour peut sembler peu réaliste, mais une suggestion peut offrir des bénifices indirects. Par exemple, il peut sembler impratique d'augmenter la hauteur du cubilot, mais sa hauteur effective peut être augmentée en le gardant toujours plein et en s'assurant d'utiliser de la petite ferraille bien distribuée.

Même si vous ne devez pas appliquer toutes les suggestions préventives qui précèdent, ces listes contiennent des propositions prouvées et pratiques pour améliorer la marche de votre cubilot en modifiant sa conception, son opération ou son utilisation. Le rendement extraordinaire des deux cubilots à vent divisé, indique qu'un vent divisé devrait représenter la première modification à effectuer lorsque la hauteur de la cheminée est adéquate (5). Le seul désavantage est que l'on doit utiliser plus de coke lors de la préparation du lit ce qui pourrait diminuer le rendement global de la fusion à moins que l'on s'assure une bonne récupération des chutes de coke et des durées de fusion plus longues. Un bon nombre des meilleurs

cubilots utilisaient un vent chaud et l'enrichissement du vent par l'oxygène; ceci suggère que l'utilisation de ces techniques contribue à améliorer le rendement de la fusion. Ces résultats coincident avec d'autres résultats rapportés dans la documentation sur le sujet(15, 16, 17). Deux des dix cubilots les plus médiocres utilisent l'enrichissement par l'oxygène. Ces résultats ne sont nullement contradictoires ou indicateurs de cette technique ils ne font qu'indiquer que la technique d'enrichissement ou que toute autre technique nouvelle ne peut combattre toutes les anomalies de conception et d'opération des cubilots. Les systèmes de récupération du vent chaud améliorent beaucoup les rendements de la fusion, mais les effets des systèmes à vent chaud à chauffage indépendant semblables à ceux mis à l'essai semblent moins évidents (18, 19, 20). Même si la consommation de coke est réduite de beaucoup, les bilans calorifiques ne s'accordent pas sur les effets qu'ont ces systèmes indépendants sur le rendement de la fusion (21, 22). Cependant, l'enrichissement par l'oxygène et l'utilisation d'un vent chaud feront plusqu'améliorer le rendement de la fusion du cubilot. Lorsque ceux-ci sont utilisés correctement, ils peuvent améliorer le contrôle du cubilot (15, 16, 23, 24, 25). Ainsi une amélioration de l'efficacité globale est réalisée en augmentant le rendement (16, 26), une diminution des coûts de la charge est obtenue en augmentant le gain en carbone. On obtient également une diminution des pertes en silicium (16, 27, 28).

Même si la limite théorique du rendement de la fusion du cubilot est déterminée par sa conception. C'est son opération

et son contrôle qui déterminent jusqu'où en proximité et en stabilité de conception peut être approchée durant la fusion quotidienne. Nous avons discuté de l'influence de la technique de chargement sur la différence entre la hauteur actuelle et la hauteur effective du cubilot. L'utilisation de charges bien équilibrées et une profondeur de lit de coke adéquate peuvent réduire les pertes de chaleur dans les gaz d'échappement en évitant des profondeurs de lit de coke excessives et elles peuvent augmenter le rendement global en réduisant les rebutsdécoulant de hauteurs de lit inadéquates. La figure 5 illustre un exemple de la situation antérieure; nos calculs ont démontré qu'une profondeur initiale de lit excessive a amené une perte de 1800 kg (4000 lbs) de coke par jour en chaleur latente non récupérable dans les gaz de la cheminée. D'autre part, à la fin de la fusion illustrée à la figure 4, une hauteur de lit inadéquate a entraîné un taux de rebuts élevé, occasionné par des reprises, des gouttes froides et des profondeurs de trempe excessives.

Des conditions de fusion instables responsables des rendements médiocres illustrés aux figures 4 à 6 sont le résultat de contrôle inadéquat de l'opération du cubilot venant d'un manque de compréhension des procédés de fusion de base. Un mauvais contrôle des entrées dans le cubilot entraîne un fonctionnement médiocre et variable. A une des fonderies que nous avons visitées, où le vent et la charge métallique n'étaient pas pesés, la température au bec de coulée était de 1540°C (2800°F), température trop élevé naturellement. Lorsque

nous avons questionné une équipe de travail, ceux-ci nous on répondu: "Aujourd'hui le cubilot est assez chaud qu'il "fume" et hier il était assez froid que nous ne pouvions pas couler". Cette fonderie payait le prix d'un mauvais contrôle, rejets excessifs un jour et surchauffage inutile le lendemain.

Fait à remarquer, le tableau 5 et la liste de suggestions pour un cubilot idéal ne considèrent pas les causes réelles d'un mauvais contrôle du cubilot. Nous ne pouvons considérer qu'un dispositif de pesée de l'air et qu'une balance pour les charges assurent un contrôle adéquat du cubilot. Ce contrôle est aussi le résultat d'un personnel bien informé et attentif, du fondeur au gestionnaire. Même si nous ne pouvons pas mesurer ce facteur qui varie d'une fonderie à l'autre, celui-ci fut étudié en corrélation avec le fonctionnement du cubilot.

Bien que l'on nécessite une bonne conception et une technique opérationnelle adéquate pour maximiser la marche du cubilot, le rendement global de la fusion varie selon certaines variables externes au cubilot. En plus, lorsque le milieu du fonctionnement global s'élargit, ces variables externes se multiplient et exercent une influence plus prononcée lorsque regroupées. Diminuer les pertes de coke peut signifier une augmentation de 10% du rendement du département de la fusion. Une augmentation de la durée de la fusion de 1 à 4 heures ou une diminution de 55°C (100°F) entraîne une autre augmentation du rendement global sans aucun frais encouru, ceci équivaut à un vent divisé ou à un enrichissement par l'oxygène. Finalement,

dans une vue d'ensemble élargie, le fonctionnement global de la fusion, basé sur le nombre de pièces coulées expédiées et sur l'achat de coke, est grandement affecté par le rendement du cubilot ou par le taux de conversion de métal liquide en pièces coulées finies qui démontrent l'efficacité de la fonderie.

Utilisons, comme exemple, la fonderie no 24 dont les données sur le rendement du cubilot, du département de la fusion et de la fonderie en général sont aux tableaux 2 et 3. Si le rendement de cette fonderie était seulement de 60%, le coût du coke serait 77.30$/tonne métrique (70.00$/tonne) de pièces coulées expédiées. Une augmentation du rendement de 10% diminuerait les coûts en coke à 66.30$/tonne métrique (60.00$/tonne), ce qui signifie une économie de 11.00$/tonne métrique (10.00$/tonne). Le fait que le rendement du cubilot varie selon le rendement global de la fusion et de la fonderie peut être bénéfique au fondeur, mais il peut aussi devenir un embêtement. Augmenter le rendement du cubilot offre d'autres moyens d'augmenter le rendement global de la fusion de la fonderie et de réduire les coûts de fusion. D'autre part, toutes les tentatives pour améliorer le rendement de la fusion du cubilot en utilisant des rapports de coke élevés peu réalistes entraînent une diminution nette du rendement global si les anomalies du fusion causent une réduction de la production.

Les résultats obtenus lors de notre visite des 30 fonderies furent utilisés, dans un premier temps pour quantifier le rendement réel de la fusion, et en second lieu, ils permirent

d'identifier les rendements médiocres et de les améliorer. Depuis notre visite, plusieurs fonderies ont modifié certaines opérations et nous ont communiqué les résultats suivant:

1) la fonderie no 28 a augmenté le rapport initial métal:coke de 6:1 à 7,5:1. Le rendement n'en fut point affecté et ceci a représenté une économie de 250$ par jour;
2) la fonderie no 27 a modifié sa technique de maintien durant la nuit afin de réduire la hauteur du lit lors de l'amorçage le lendemain matin, une économie de 350$ par jour;
3) la fonderie no 22 s'est informée auprès de l'AFS et du manufacturier du cubilot. Par la suite, fut modifié, de même que le rapport des tuyères a technique de retorchage et rapport nominal métal:coke. Approximativement 40,000$/an furent épargnés;
4) la fonderie no 21 a modifié la technique d'utilisation du flux et la technique de retorchage afin de réduire le coût des réfractaires. Ceci a représenté une économie importante mais nous n'avons pas le montant exact.

Conclusion

1) Le cubilot représente un maillon très important parmi les procédés utilisés en fonderie. Même si une évaluation du rendement de la fusion devrait normalement se concentrer sur le cubilot, tout le reste de la fonderie affecte son comportement et doit être considérée.

2) Le rendement des 30 cubilots étudiés peut se résumer comme suit:

   a) rendement nominal: les rapports métal:coke varient de 15,4:1 à 3,8:1,

   b) rendement actuel: les rapports de coke varient de 10,3:1 à 2,1:1 et leur efficacité varient de 46,5% à 9,1%,

   c) pour ce qui est du rendement normalisée; les rapports de coke se classent de 11,4:1 à moins de 4,1:1 avec une efficacité de 53% à moins de 19%.

3) Des conditions instables de fusion sont la cause principale de la différence entre les rendements nominaux et actuels, tandis que la raison principale pour la variation qui existe entre les rendements actuels et normalisés est surtout due au fait que la température au bec de coulée soit le facteur prédominant affectant le rendement de la fusion du cubilot.

4) La classification des cubilots selon leur rendement de fusion normalisé identifie les variables qui suivent comme étant des facteurs très importants pour améliorer le rendement du cubilot:

   a) la température du métal au bec de coulée;

b) les systèmes à vent divisé, d'enrichissement par l'oxygène et à vent chaud;

c) la durée de la fusion;

d) le contrôle du cubilot;

e) le diamètre et la hauteur du cubilot.

5) Certaines variables dans l'environnement immédiat du cubilot peuvent jouer un rôle significatif dans la détermination du rendement global. En voici quelques-unes:

a) les pertes de coke;

b) les pertes de chaleur lors de la manipulation de la fonte liquide;

c) la productivité.

6) Si nous récupérons 50% des chutes de coke, les coûts de coke pour produire de la fonte liquide au bec de coulée varieront de 27 à 110$/tonne métrique (24 à 100$/tonne). En supposant une productivité de 67%, les coûts de coke pour la fonderie seront de 40 à 165$/tonne métrique (36 à 150$/tonne) de pièces coulées expédiées. Ces coûts seront augmentés de 5 à 10% si nous ne récupérons pas les chutes de coke, selon la quantité de chutes et la durée de la fusion.

7) Plusieurs des fonderies visitées pourraient béneficier de gains appréciables sans qu'elles n'aient à débourser un sous en appliquant un ou plusieurs des conseils suivants:

a) l'augmentation de la durée de fusion de 1 à 4 heures, 10 à 20$/tonne métrique (9 à 18$/tonne) de fonte liquide;

b) la diminution de la température au bec de coulée, 15 à 20$/tonne métrique (13 à 18$/tonne) de fonte liquide pour une baisse de 80°C (150°F);

c) la diminution des pertes de coke, 5 à 10$/tonne métrique (4 à 9$/tonne) de fonte liquide;

d) l'augmentation de la productivité, 5 à 10$/tonne métrique (4 à 9$/tonne) de pièces coulées expédiées, si elle passe de 60 à 70%;

e) l'amélioration de la technique et du contrôle du cubilot, économie substantielle mais non déterminée.

8) Suite à l'établissement d'une technique opérationnelle saine pour un cubilot contrôlé, l'amélioration du rendement de la fusion sera obtenu à l'aide des nouvelles techniques. Un choix judicieux est nécessaire parmi celles-ci. Les conduites de vent divisées, l'enrichissement par l'oxygène, le système à vent chaud et l'injection de poussières de coke dans les tuyères en sont quelques unes.

REMERCIEMENTS

Nous désirons remercier sincèrement M. R.K. Buhr, Chef de la section de la fonderie, Laboratoires de recherche en métallurgie physique, pour son intérêt, son encouragement et ses conseils judicieux qui ont permis que ce travail soit non seulement possible, mais aussi qu'il soit très pertinent pour le fondeur. Nous désirons exprimer notre plus sincère gratitude au personnel de chacune des 30 fonderies que nous avons visitées; sans leur intérêt et leur collaboration, ce travail n'aurait pu être publié.

Reférences

1. P. Dwyer, "Cupola Practice not Consistent"; Foundry, vol. 48, p. 671-678 (1920).

2. R.D. Warda, R.K. Buhr, "A Method for Sampling Cupola Emissions"; AFS Transactions, vol. 81, p. 24-31 (1973).

3. A. Stone, Gray Iron Research Institute, Private Communication.

4. "Cupola Handbook"; Cupola Research Committee, American Foundrymen's Society, Des Plaines IL 60016, USA (1975).

5. H.J. Leyshon, M.J. Selby, "Improved Cupola Performance by Correct Distribution of the Blast Supply Between Two Rows of Tuyeres"; British Foundryman, vol. 65, p. 43-55 (1972).

6. P. Dwyer, "Bill Has a Word on Cupola Practice - I);Foundry, vol. 51, p. 318-320 (1923).

7. R.W. Lobenhofer, "Apples, Oranges and Coke"; Modern Casting, vol. 69, p. 41 (July 1979).

8. G.K. Elliott, "Superheats in the Electric Furnace";Foundry, vol. 49, p. 714-719 (1921).

9. H.W. Lownie, "Some New Factors Affecting Cupola Operation"; Modern Casting, vol. 49, p. 99-106 (June 1966).

10. J.E. Rehder, "Modern Iron Melting Techniques and their Applications"; Paper no. 29, 33rd International Foundry Congress, New Dehli (1966).

11. R.A. Clark, "Gray Iron Heat Conservation"; American Foundryman, vol. 20, p. 40-43 (Oct. 1951).

12. J.P. Graham et al, "The Effect of Coke Size and Coke Types on Cupola Performance"; British Foundryman, vol. 55, p. 203-218 (1962).

13. J.E. Rehder, "Heat Economy in the Cupola"; Foundry, vol 107, p. 44, 51-52, 55-56 (May 1979).

14. N.H. Keyser, W.L. Kann, "Effect of Scrap Size on Tapping Temperature of a Cupola"; AFT Transactions, vol. 66, p. 397-398 (1958)

15. A.P. Bower, "Oxygen Enrichment Experience"; British Foundryman, vol. 68, p. 314-319 (1975).

16. H.C. Rolseth, "The Effect of Oxygen Enrichment on Energy Consumption in Iron Cupola Melting"; AFT Transactions, vol. 84, p. 295-298 (1976).

17. G. Powner, D. Rogers, R.J. Turley, "The Economic Advantages of Recent Improvements in Cold Blast Melting Practice"; British Foundryman, vol. 71, p. 135-143 (1978).

18. F.K. Vial, "Savings from Hot Blast Cupola"; Iron Age, vol. 120, p. 1155-1156 (1927).

19. L.G. Berryman, "Air Preheater Unit for Small Cupola Aids Melt Efficiency"; American Foundryman, vol. 20, p. 40-42 (Nov. 1951).

20. Anon. "Hot Blast Cupola Practice"; Foundry Trade Journal, vol. 96, p. 362 (1954).

21. F.C. Evans, "Operation and Design of Blast Cupolas"; Foundry Trade Journal, vol. 91, p. 247-251, 279-282 (1951).

22. W. Patterson, B. Kohler, "Influence of a Blast Temperature of 500°C on Performance, Heat Balance and Some of the Processes Occuring in the Cupola"; Giessereiforschung in English, vol. 23, no. 3, p. 95-108 (1971).

23. A.W. Gregg, "Oxygen and Cupola Operation"; Foundry vol. 76, p. 86-90 (juin 1948).

24. Anon. "Cupola Development - Report of Sub-Committee T.S.43 of the Technical Council of the Inst. of Br. Foundryman); Foundry Trade Journal, vol. 97, p. 47-51, 69-75 (1954).

25. E.L.W. Loebbecke, "Development of Hot Blast Melting Technique in Europe"; AFT Transactions, vol. 64, p. 171-196 (1956)

26. C. Gresty, "Fuel Economy in the Iron Foundry"; Foundry Trade Journal, vol. 72, p. 31-34 (1944).

27. F.K. Vial, "Economics of Cupola Operational Control"; AFT Transactions, vol. 54, p. 507-541 (1946).

28. G.A.H. Jungbluth, K. Stockamp, "Chemical Reactions in the Cupola"; Foundry Trade Journal, vol. 99, p. 377-387, 405-411, 643-650 (1955).

29. R.D. Warda, E.F. Darke, "60 years of Cupola Literature";Report MRP/PMRL 80-75 (TR), CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Ontario, K1A-OG1, Canada.

Tableau 1. - Systèmes de fusion et critères de rendement utilisés pour compiler les données

SYSTÈME DE FUSION	CRITÈRE DE RENDEMENT
CUBILOT	$\frac{\text{SORTIE}}{\text{ENTRÉE}} = \frac{\text{FONTE LIQUIDE AU BEC}}{\text{COKE CONSOMMÉ DANS LE CUBILOT}}$
DEPARTEMENT DE FUSION	$\frac{\text{SORTIE}}{\text{ENTRÉE}} = \frac{\text{FONTE LIQUIDE AU BEC}}{\text{COKE ACHETÉ}}$
FONDERIE	$\frac{\text{SORTIE}}{\text{ENTRÉE}} = \frac{\text{PIÈCES COULÉES EXPEDIÉES}}{\text{COKE ACHETÉ}}$

Tableau 2. - Rendement nominal, actuel et normalisé lors de la fusion en cubilot.

Rendement de la fusion au cubilot							
nominal		actuel			normalisé		
Fonderie No.	M:C 1	Fonderie No.	R.F. %	M:C 2	Fonderie No.	R.F. %	M:C 1
1	15.4:1	2	46.5	10.3:1	5	53.0	11:4:1
2	11.1:1	4	41.0	9.8:1	2	53.0	11.4:1
3	10.8:1	5	45.5	9.2:1	15	43.0	9.3:1
4	10.5:1	6	38.2	8.6:1	27	41.0	8.8:1
5	10.4:1	9	37.8	8.2:1	4	41.0	8.8:1
6	10.0:1	14	36.0	8.1:1	19	41.0	8.8:1
7	10.0:1	15	34.4	7.7:1	15a	39.0	8.4:1
8	10.0:1	16	35.4	7.7:1	6	38.5	8.3:1
9	9.5:1	7	33.8	7.7:1	9	38.0	8.2:1
10	9.1:1	19	35.7	7.5:1	14	37.5	8.1:1
11	9.1:1	15a	32.5	7.3:1	23	37.0	8.0:1
12	9.1:1	21	30.7	7.0:1	28	37.0	8.0:1
13	9.1:1	10	32.3	7.0:1	16	33.0	7.1:1
14	8.8:1	22	31.8	6.8:1	21	32.5	7.0:1
15	8.8:1	17	28.7	6.7:1	29	32.5	7.0:1
16	8.8:1	11	28.1	6.7:1	24	29.0	6.3:1
15a	8.4:1	23	30.4	6.6:1	22	28.5	6.1:1
17	8.3:1	26	28.9	6.6:1	10	28.0	6.0:1
18	8.1:1	27	28.2	6.2:1	26	27.5	5.9:1
19	8.0:1	20	29.1	6.2:1	12	27.0	5.8:1
20	8.0:1	12	26.9	6.0:1	8	26.0	5.6:1
10a	8.0:1	10a	27.6	6.0:1	7	25.0	5.4:1
21	7.4:1	18	25.7	6.0:1	13	22.5	4.9:1
22	7.3:1	24	26.8	5.8:1	3	20.0	4.3:1
23	7.2:1	13	25.7	5.8:1	10a	19.5	4.2:1
24	7.1:1	3	26.0	5.7:1	20	19.0	4.1:1
25	7.0:1	8	26.1	5.7:1	1	19.0	4.1:1
26	6.8:1	28	26.3	5.6:1			
27	6.7:1	1	21.2	4.7:1	les rendements des cubilots 11, 12, 18 et 30 étaient trop bas pour normaliser		
28	6.0:1	29	21.4	4.5:1			
29	5.5:1	25	10.7	2.5:1			
30	3.8:1	30	9.2	2.1:1			

Tableau 1. - Compte-rendu du rendement du département de fusion et du rendement global de la fonderie.

Rendement du département de la fusion										Rendement global de la fonderie *									
50% chutes de coke perdues					100% des chutes de coke perdues					50% des chutes de coke perdues					100% des chutes de coke perdues				
Fond. No.	R.F. à	M:C	Coût du Coke x $/tonne m.	($/ton)	Fond. No.	R.F.	M:C	$/tonne m.	($/ton)	Fond.	R.F.	M:C	$/tonne m.	($/ton)	Fond.	R.F.	M:C	$/tonne m.	($/ton)
2	39.4	8.7:1	26.55	(24.14)	2	37.1	8.2:1	28.17	(25.61)	2	26.4	5.8:1	39.83	(36.21)	2	24.9	5.5:1	42.26	(38.42)
4	34.1	8.1:1	28.52	(25.93)	4	31.9	7.5:1	30.80	(28.00)	4	23.0	5.4:1	42.78	(38.90)	4	21.4	5.0:1	46.20	(42.00)
5	30.1	7.8:1	29.61	(26.92)	5	30.0	7.4:1	31.22	(28.38)	5	25.5	5.2:1	44.42	(40.38)	5	24.1	5.0:1	46.83	(42.57)
6	33.4	7.5:1	30.80	(28.00)	6	32.1	7.2:1	32.08	(29.16)	6	22.4	5.0:1	46.20	(42.00)	6	21.5	4.8:1	48.11	(43.74)
14	31.2	7.0:1	33.00	(30.00)	14	30.3	6.8:1	33.97	(30.88)	14	20.9	4.7:1	49.50	(45.00)	14	20.3	4.6:1	50.95	(46.32)
19	31.8	6.7:1	34.47	(31.34)	19	31.8	6.7:1	34.47	(31.34)	19	21.3	4.5:1	51.71	(47.01)	19	21.3	4.5:1	51.71	(47.01)
15	29.6	6.6:1	35.00	(31.82)	15	27.9	6.1:1	37.26	(33.87)	15	19.8	4.4:1	52.50	(47.73)	15	18.7	4.2:1	55.89	(50.81)
16	29.3	6.4:1	36.09	(32.81)	16	27.9	6.1:1	37.87	(34.43)	16	19.6	4.3:1	54.14	(49.22)	16	18.7	4.1:1	56.81	(51.65)
15a	28.1	6.3:1	36.66	(33.33)	15a	27.3	6.1:1	37.87	(34.43)	15a	18.8	4.2:1	54.99	(50.00)	15a	18.3	4.1:1	56.81	(51.65)
7	27.2	6.2:1	37.26	(33.87)	7	24.6	5.6:1	41.25	(37.50)	7	18.2	4.2:1	55.89	(50.81)	7	16.5	3.8:1	61.88	(56.25)
9	28.4	6.2:1	37.26	(33.87)	27	25.6	5.6:1	41.25	(37.50)	9	19.0	4.2:1	55.89	(50.81)	27	15.2	3.8:1	61.88	(56.25)
21	26.0	5.9:1	39.15	(35.59)	9	24.7	5.4:1	42.78	(38.89)	21	17.4	4.0:1	58.72	(53.39)	9	15.4	3.6:1	64.17	(58.34)
17	24.4	5.7:1	40.52	(36.84)	17	22.7	5.3:1	43.58	(39.62)	17	16.3	3.8:1	60.79	(55.26)	17	14.7	3.6:1	65.37	(59.43)
27	25.6	5.6:1	41.25	(37.50)	21	23.0	5.2:1	44.42	(40.38)	27	17.2	3.8:1	61.88	(56.25)	21	16.0	3.5:1	66.63	(60.57)
11	23.5	5.6:1	41.25	(37.50)	11	21.9	5.2:1	44.42	(40.38)	11	15.7	3.8:1	61.88	(56.25)	11	14.7	3.5:1	66.63	(60.57)
23	25.3	5.5:1	42.00	(38.18)	23	23.9	5.2:1	44.42	(40.38)	23	17.0	3.7:1	63.00	(57.27)	13	14.9	3.5:1	66.63	(60.57)
10	25.2	5.5:1	42.00	(38.18)	26	22.0	5.0:1	46.20	(42.00)	10	16.9	3.7:1	63.00	(57.27)	26	14.7	3.4:1	69.30	(63.00)
22	25.1	5.4:1	42.78	(38.89)	22	22.3	4.8:1	48.11	(43.75)	22	16.8	3.6:1	64.17	(58.34)	22	14.9	3.2:1	72.19	(65.63)
26	22.9	5.2:1	44.42	(40.38)	10	21.9	4.8:1	48.11	(43.75)	26	15.3	3.5:1	66.63	(60.57)	10	14.7	3.2:1	72.19	(65.63)
12	22.4	5.0:1	46.20	(42.00)	12	21.5	4.8:1	48.11	(43.75)	12	15.0	3.4:1	69.30	(63.00)	12	14.4	3.2:1	72.19	(65.63)
24	22.7	5.0:1	46.20	(42.00)	24	21.3	4.7:1	49.15	(44.68)	24	15.2	3.4:1	69.30	(63.00)	24	14.3	3.1:1	73.72	(67.02)
28	23.0	4.9:1	47.15	(42.86)	28	22.0	4.7:1	49.15	(44.68)	28	15.4	3.3:1	70.72	(64.29)	28	14.7	3.1:1	73.72	(67.02)
10a	21.4	4.7:1	49.15	(44.68)	10a	19.5	4.3:1	53.72	(48.84)	10a	14.3	3.1:1	73.72	(67.02)	10a	13.1	2.9:1	80.59	(73.26)
20	21.7	4.7:1	49.15	(44.68)	20	18.8	4.1:1	56.36	(51.22)	20	14.5	3.1:1	73.72	(67.02)	20	12.6	2.7:1	84.51	(76.83)
3	20.4	4.5:1	51.34	(46.67)	3	18.1	4.0:1	57.75	(52.50)	3	13.7	3.0:1	77.01	(70.01)	3	12.1	2.7:1	86.63	(78.75)
13	20.0	4.5:1	51.34	(46.67)	13	17.1	3.9:1	59.24	(53.85)	13	13.4	3.0:1	77.01	(70.01)	13	11.6	2.6:1	88.85	(80.78)
18	18.4	4.3:1	53.72	(48.84)	18	15.8	3.7:1	62.44	(56.76)	18	12.3	2.9:1	80.59	(73.26)	18	10.6	2.5:1	93.65	(85.14)
8	18.7	4.1:1	56.34	(51.22)	1	16.7	3.7:1	62.44	(56.76)	8	12.5	2.7:1	84.51	(76.83)	1	11.2	2.5:1	93.65	(85.14)
1	18.7	4.0:1	57.75	(52.50)	29	16.6	3.5:1	66.00	(60.00)	1	12.1	2.7:1	86.63	(78.75)	29	11.1	2.3:1	99.00	(90.00)
29	18.0	3.8:1	60.79	(55.26)	8	15.5	3.4:1	67.94	(61.76)	29	12.1	2.5:1	91.18	(82.89)	8	10.4	2.3:1	101.90	(92.64)
25**	9.0	2.1:1	89.10	(81.00)	25**	8.1	1.9:1	98.42	(89.47)	25**	6.0	1.4:1	133.65	121.50)	25**	5.4	2.3:1	141.85	130.77)
30**	7.4	1.7:1	110.00	100.00)	30**	7.0	1.6:1	116.88	106.25)	30**	5.0	1.1:1	165.00	150.00)	30**	4.7	1.1:1	170.00	154.55)

*Basé sur une productivité réel de pièces coulées de 67% de la fonte liquide au bec de coulée et exprimé en termes de poids de pièces coulées expédiées.
xBasé sur un coût de coke de 212$/tonne métrique (210$/tonne). FAR à la fonderie, et exprimé en termes de poids de fonte liquide au bec de coulée.
xxCes fonderies utilisent du coke de haut-fourneau à 187$/tonne métrique (170$/tonne).

Tableau 4. - Effet des pertes de température dans la poche sur le rendement du cubilot et du département de fusion.

FONDERIE NO./CAS	TEMPERATURE DU METAL			RENDEMENT DE LA FUSION				
	BEC DE COULEE DU CUBILOT °C (°F)	BEC DE L'AVANT CREUSET °C (°F)	AU MOULE °C (°F)	CUBILOT	DEPARTEMENT DE LA FUSION			
				M.E. %	M.E. AU MOULE	M:C	COÛT DU COKE $/TONNE M. ($/TONNE)	ECONOMIE DE COKE $/JOUR *
6/A	1482 (2700)	1315 (2400)	1288 (2350)	38.2	26.3	7.5	30.80 (28.00)	0
6/B	1482 (2700)	1382 (2520)	1288 (2350)	38.2	29.2	7.9	29.30 (26.60)	38.40
6/C	1416 (2580)	1315 (2400)	1288 (2350)	56.5	41.7	11.4	20.30 (18.40)	248.00
24/D	1493 (2720)	1327 (2420)	1288 (2350)	26.8	17.8	5.0	46.30 (42.00)	0
24/E	1493 (2720)	1404 (2560)	1288 (2350)	26.8	19.9	5.3	43.70 (39.60)	36.50
24/F	1416 (2480)	1327 (2420)	1288 (2350)	46.5	32.3	8.7	26.60 (24.10)	263.00

* Basé sur des données actuelles: FOND. No. 6: 4.2 tonnes m./h (4.65 tonne/h) 5.5 h/jour
FOND. No. 24:3.6 tonnes m./h (3.95 tonne/h) 3.7 h/jour
Prix du Coke: 232 $/tonne m. (210 $/tonne)

Cas A: cas réel, perte de chaleur dans l'avant creuset, 167°C (300°F)

Cas B: cas hypothétique, perte de chaleur dans l'avant creuset, 100°C (212°F) refroidissement de la fonte avec de la ferraille, 67°C (120°F).

Cas C: cas hypothétique, perte de chaleur dans l'avant creuset comme dans B, la la température au bec réduite, 67°C (120°F).

Cas D: cas réel, perte de chaleur dans l'avant creuset comme dans A.

Cas E: cas hypothétique, perte de chaleur dans l'avant creuset 89°C (160°F) fonte refroidie à 78°C (140°F) avec de la ferraille.

Cas F: cas hypothétique, perte de chaleur dans l'avant creuset comme dans E, la température au bec réduite, 78°C (140°F).

Tableau 5. - Comparaison entre les caractéristiques moyennes des 10 meilleurs cubilots et celles des 10 cubilots les plus médiocres.

CARACTERISTIQUE		10 meilleurs	10 pires
Rendement de la Fusion	%	37.6±5.6	27.2±3.2
Chaleur Latente dans les Gaz d'échappement	%	29.3±9.1	23.7±10.5
Chaleur Sensible dans les Gaz d'échappement	%	12.2±4.6	18.6±7.0
Pertes de Chaleur par la Paroi	%	14.4±6.9	23.0±5.2
Durée de la Fusion	%h	8.8±4.1	1.8±1.1
Diamètre de la Zone de Fusion	cm (po)	126±38 (49.6±15.1)	82±23 (32.1±9.0)
Distance Entre les Tuyères et la Porte de Chargement	m (po)	5.2±1.2 (203±48)	4.3±0.8 (168±30)
Température de la Fonte	°C (°F)	1505±24 (2742±44)	1440±33 (2625±60)
Rapport de Combustion	%	55±15	61±11
Vélocité Spécifique du Vent	$Nm^3/m^2/min$ ($Spi^3/pi^2/min$)	97±26 (318±85)	103±18 (339±58)
Taux de production Spécifique	$Tonnes/h/m^2$ ($Tons/h/ft^2$)	7.9±1.6 0.81±0.16	5.8±0.9 (0.59±0.09)
Contrôle du Vent		9/10	1/10
Pesée des Métaux		9/10	7/10
Coke		10/10	9/10
Vent Chaud		4/10	0/10
Enrichissement par l'oxygène		6/10	2/10
Vent Divisé		2/10	0/10

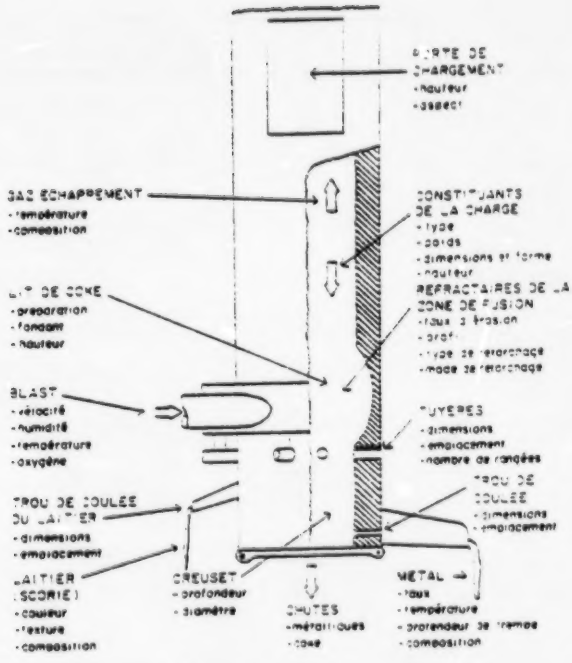

Fig. 1. Représentation schématique des paramètres d'essai sur un cubilot. (neg 8048)

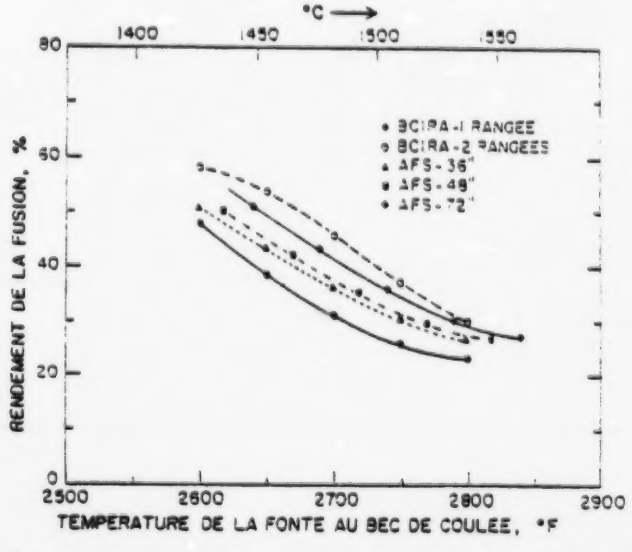

Fig. 2. Corrélation entre la température de la fonte et le rendement de la fusion pour quelques cubilots choisis. (nég 8046)

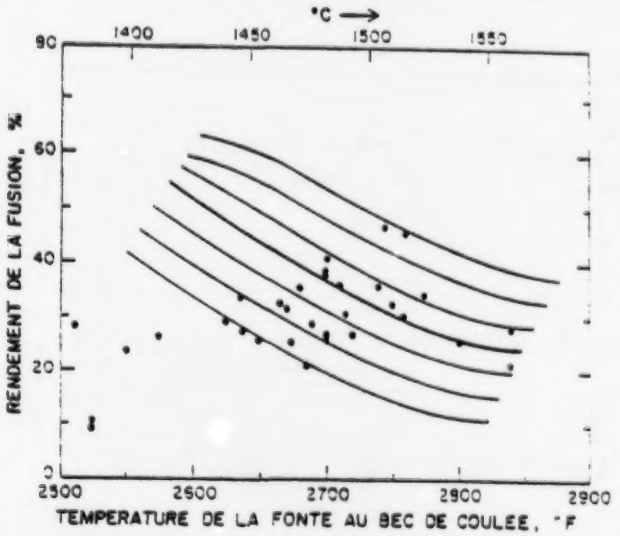

Fig. 3. Données obtenues lors de notre étude des cubilots (points) superposés aux courbes de normalisation des températures. (nég 8045)

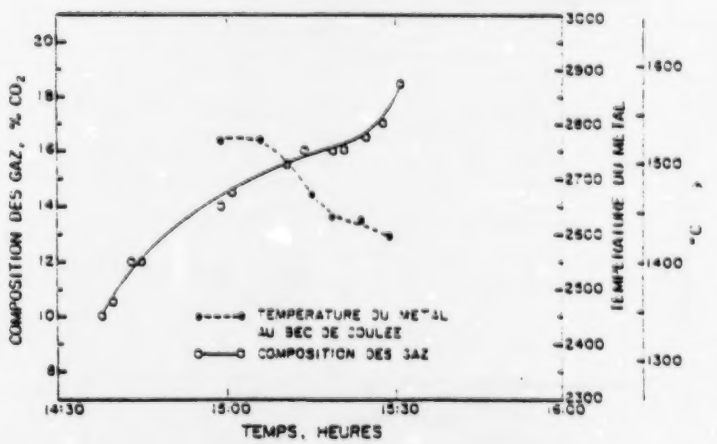

Fig. 4. Teneur en CO_2 dans les gaz d'échappement et la température du métal pour un petit cubilot dont le lit de coke diminuait rapidement durant la fusion. (nég 8042)

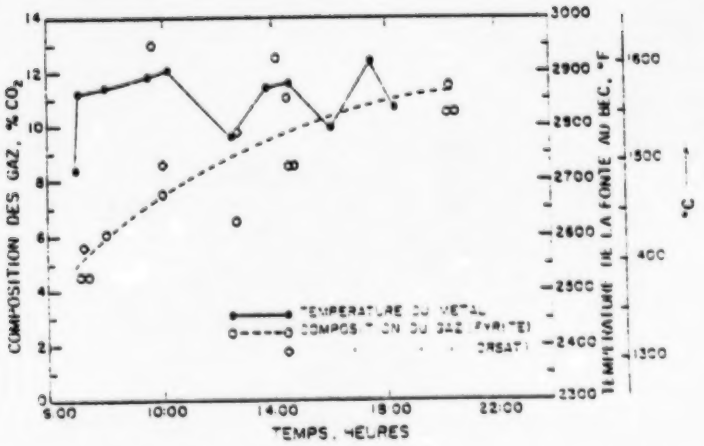

Fig. 5. Teneur en CO_2 dans les gaz d'échappement et la temp-rature du métal pour un cubilot de grosse dimension dont le lit de coke diminuait lentement durant la fusion. (nég 8049)

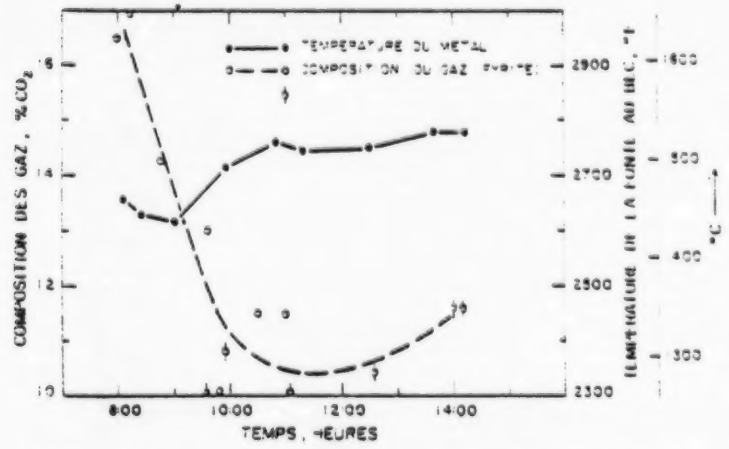

Fig. 6. Teneur en CO_2 dans les gaz d'échappement et la température du métal dans un cubilot dont le lit de coke augmentait tout au long de la fusion. (nég 8047)

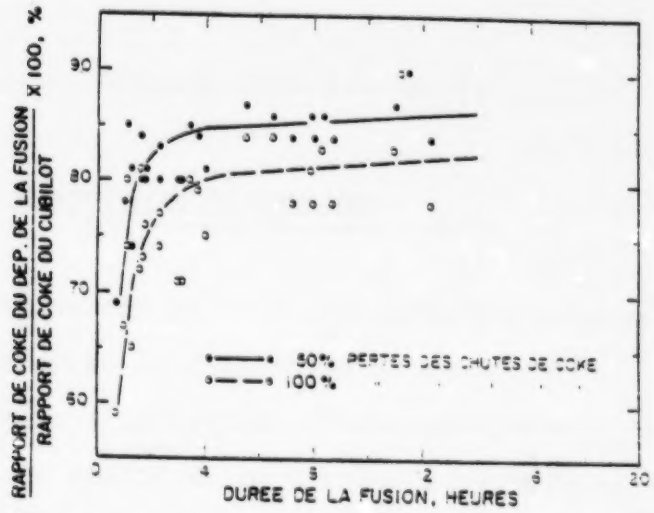

Fig. 7. Corrélation entre le rapport de coke du département de la fusion et le rapport de coke du cubilot. (nég 8041)

CAS NO.	DUREE DE FUSION h	TAUX DE FUSION Tonne m. h (Tonne/h)	CHUTES DE COKE kg (%)	CUBILOT R.F %	CUBILOT ③ M/C	DEP. DE FUSION ④ M/C	DEP. DE FUSION COUT $/Tonne m. $/Tonne
1	8	11 4 (12 5)	270 (2900)	62	13 8	11 3	20 44 (18 58)
2	4	4 3 (4 7)	320 (700)	52	11 6	9·4	24 57 (22 34)
3	1·4	3 5 (3 9)	250 (550)	25 5	5 7	4 5	51 34 (46 67)
4	8	11 4 (12 5)	270 (2900)	57	12 5	10 3	22 43 (20 39)
5	4	4 3 (4 7)	320 (700)	44	9 6	7 9	29·24 (25 58)
6	1 4	3 5 (3 9)	250 (550)	29 5	6 5	5 0	46 20 (42 00)

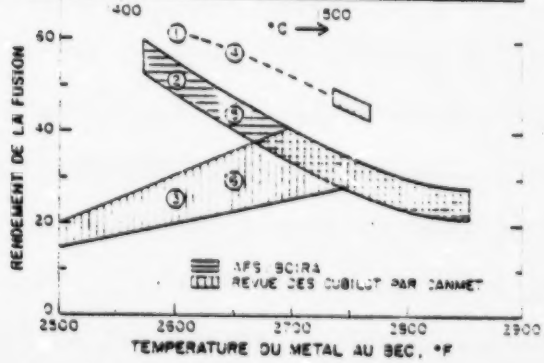

Fig. 8. Représentation schématique illustrant trois groupes de cubilot, leurs rendements et les coûts typiques en coke pour chacun d'eux. (nég 8043)

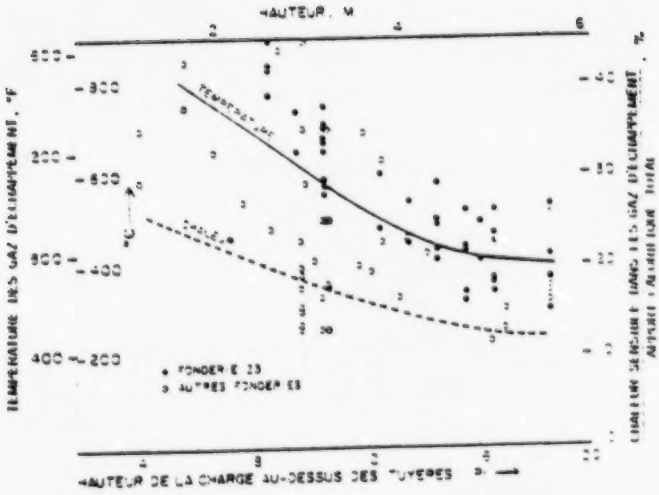

Fig. 9. Corrélation entre la température des gaz de la cheminée et la hauteur de la charge au-dessus des tuyères. La chaleur contenue dans les gaz d'échappement fut calculée selon la température. (négs 3044)

Appendice A

Méthodologie des essais

Conception et dimensions du cubilot

Nous avons mesuré et noté les dimensions suivantes sur chaque cubilot après la réparation du réfractaire:

- diamètre intérieur au niveau du creuset, de la zone de fusion et de la partie supérieure de la cheminée;
- dimension et emplacement des trous de coulée et à laitier;
- dimension, emplacement et nombre de rangees de tuyères
- hauteur de la porte de chargement au-dessus des tuyères les plus élevées

Après l'ouverture du fond ouvrant et le refroidissement du cubilot, nous avons mesuré les diamètres à tous les 30 cm (12 po.) au-dessus des tuyères (1) afin de définir le profil de la zone de fusion et l'usure du réfractaire. Nous avons aussi noté et quantifié, lorsque c'était possible, tous les extras importants comme les systèmes à vent divisé, à vent chaud et d'enrichissement par l'oxygène, les cubilots à paroi refroid à l'eau et les types de réfractaire. Les accessoires de contrôle, tels les contrôleurs de vent et les balances, furent examinés et recalibrés lorsque c'était nécessaire.

Les entrées du cubilot

La vélocité, la température, la teneur en oxygène et le taux d'humidité furent utilisés pour caractériser le vent. La vélocité fut déterminée dans la conduite à l'aide des méthodes suggérées par l'ATSM et l'EPA sur l'échantillonnage des gaz d'échappement. Nous avons utilisé un tube de Pitot pour déterminer les profils de la vélocité et de la pression sur deux axes dans la conduite, perpendiculaires l'un à l'autre. Après correction de la température et de la pression, la vélocité dans la conduite fut convertie en m^3/min (pi^3/min). Nous avons établi que les conditions normales seraient 102,9 kPa et 21°C (29,92 po. de Hg et 70°F). Afin de maximiser la vélocité du vent selon le taux mesuré, nous avons vérifié les conduites, la boîte à vent et les tuyères pour détecter toute fuite. Les pertes de vent peuvent varier de 5 à 20% selon l'étendue des fuites. Suite à des calculs subséquents, la vélocité moyenne du vent dans le lit représentait 88% ($^+$-9%) de la vélocité dans la conduite. Nous avons aussi mesuré 67 à 69% dans des cubilots où le nombre de fuites était excessif, ou lors de fuites importantes et lorsque le trou à laitier continuellement ouvert était près des tuyères. Afin de déterminer le plus exactement possible la température et la teneur en oxygène du vent, nous avons pris nos lectures le plus près possible des tuyères . Lorsqu'on utilisait un système à vent enrichi, nous nous sommes servis d'un analyseur de type Orsat. Nous avons mesuré le taux d'humidité à l'entrée de la conduite à l'aide d'un psychromètre.

Nous avons évalué les charges métalliques de coke, de fondant et d'alliage selon leurs poids et la grosseur des particules. Nous avons aussi noté la propreté des matériaux, la quantité de rouille et la présence de rebutsnon-ferreux. Dans plusieurs fonderies, il fut très difficile de déterminer le poids des charges métalliques. Dans ces fonderies, le poids était déterminé par le bras du chargeur "à calibration interne", à l'aide d'un benne de chargement, qui contenait environ 800 livres, ou à l'aide de balances nettement inexactes. Dans les deux premières situations, nous avons participé à la pesée pour arriver à une conclusion acceptable au deux parties pour la comparer, par la suite, au poids de la coulée qui était d'habitude calculé à vue de nez.

Dans les cas de balances défectueuses ou inexactes, nous avons essayé de les calibrer à l'aide de ce qui était disponible, comme des sacs de sable ou de pisé dont le poids était connu. La pesanteur de la charge de coke a provoqué un problème semblable mais moins difficle à résoudre. Grâce à une surveillance assidue du nombre et du taux de charge de la fourche, de la boîte, de l'auge ou de la brouette à coke,nous avons pesé, avec une certaine précision, chaque "unité" de charge. Nous avons évalué la charge de pierre à chaux comme pour le coke. L'addition de fondants et de ferro-alliages se faisait sous forme de briques, ce qui a simplifié de beaucoup l'évaluation de la pesanteur utilisée.

Les sorties du cubilot

L'évaluation des sorties du cubilot fut effectuée quantitativement pour calculer la chaleur et le bilan des matériaux et qualitativement pour définir les caractéristiques qui seront utiles à l'opérateur lors de son observation du cubilot. Naturellement, la production de la fonte liquide est la sortie la plus importante et l'on détermina sa température, sa composition, son taux de fusion ainsi que la profondeur de trempe. Nous avons déterminé la température à l'aide d'un thermocouple portatif à immersion dans le bec de coulée du cubilot. Selon le système de manutention, nous avons mesuré la température dans l'avant-creuset, dans la poche à transport et durant la coulée dans les moules. Pour ce qui est des cubilots à coulée continue, nous avons mesuré le temps pour remplir une poche à manche de 9 kg (20 lbs) glisée sous le jet de coulée. Le taux de fusion des coulées intermittentes fut déterminé à l'aide d'une ou de plusieurs des méthodes qui suivent: détermination du temps de fusion total et de la pesanteur de la coulée, détermination du nombre de poche de coulée de capacité connue qui furent remplis durant une heure ou par la comparaison avec le taux de chargement de métal.

Nous avons échantillionné la fonte liquide et la scorie à intervalles réguliers afin de déterminer visuellement toute réaction immédiate et pour analyses chimiques subséquentes. Nous avons pris des échantillons de fonte liquide dans le jet de coulée et les avons coulés dans un noyau à lingot-éprouvette en

coin du type ASTM afin de déterminer la profondeur de trempe. Plus tard, une partie de cette éprouvette fut écrasée pour l'analyse du carbone, à l'aide d'une méthode à combustion, et pour l'analyse du silicium, du manganèse, du souffre et du phosphore, à l'aide d'analyse chimique par voie humide. L'échantillonnage du laitier fut effectué à l'aide d'un moule métallique tel que suggéré par le "Gray Iron Research Institute"([3]). Après sonrefroidissement, chaque échantillon fut étudié pour sa couleur, sa texture et ses caractéristiques de fracture afin de les comparer aux conditions de fusion. Par la suite, chaque échantillon fut divisé en plusieurs gros morceaux possédant une apparence et une texture semblables, tandis que le reste fut écrasé afin d'en faire l'analyse pour déterminer leur teneur en principaux oxydes (SiO_2,CaO,Al_2O_3 et FeO). Les gros morceaux représentant l'échantillon furent placés dans des pots portant une étiquette donnant la composition et toutes les informations pertinentes. Plus tard, tous ces échantillons de scorie furent retournés aux fonderies d'origine pour servir de références.

Les conditions des gaz de la chiminée furent déterminées dans la région se situant entre 60 et 150 cm (2 à 5 pi) sous la porte de chargement. Plusieurs échantillons furent pris sur toute l'étendue de la coupe transversale du cubilot afin de vérifier les effets des gaz circulant dans les régions de faible densité de charge. Les températures furent rapportées comme maximum ou minimum pour chaque cycle de charge ou comme une moyenne. Nous avons noté le niveau de la charge lors de la

lecture de la température. Nous avons utilisé un analyseur Fyrite pour déterminer la teneur en CO_2. Afin de déterminer la teneur en oxygène et de vérifier les résultats obtenus avec l'analyseur Fyrite, nous avons utilisé périodiquementl'analyseur Orsat. La concentration en CO fut calculée à l'aide des niveaux en CO_2 connus dans les gaz d'échappement et de la teneur en O_2 dans le vent.

Même si nous ne le considérons pas comme sorties normales du cubilot, le contenu des chutes du cubilot fut identifié et leur poids évalué pour l'utiliser lors des calculs du bilan de matériaux.

Pour chaque fonderie, nous avons calculé les bilans calorifiques et de matériaux simultanément à l'aide des données accumulées durant la période de fusion journalière. Ces calculs représentent de nombreuses difficultés à cause des périodes de fusion trop courtes et des comportements instables exhibés par plusieurs cubilots. Ces difficultés se sont manifestées comme des différences significatives entre les résultats calculés et mesurés du bilan des matériaux. Par exemple, le taux de fusion d'un cubilot fut déterminé de la façon suivante: premièrement, la vélocité du vent et la teneur en oxygène furent utilisées avec le rapport de combustion des gaz d'échappement pour calculer le taux de combustion du carbone. Le taux de consommation en carbone était alors calculé pour tous les procédés de non-combustion, tels la décomposition de l'humidité du vent et le gain en carbone par le métal. Les taux de consommation de combustion et de non-combustion furent alors

combinés afin de donner le taux de consommation en carbone net. Après avoir obtenu ce taux, nous avons déterminé le taux de consommation de coke net en compensant pour la teneur en carbone du coke et les pertes de poussières de coke parmi les gaz d'échappement. En supposant que les corrélations qui suivent sont véridiques:

1) TAUX DE CONSOMMATION DU COKE DE LA CHARGE = TAUX DE CONSOMMATION DE COKE NET

2 RAPPORT NOMINAL METAL:COKE = (POIDS DE LA CHARGE METALLIQUE) - (POIDS DE LA CHARGE DE COKE),

le taux de fusion fut calculé en multipliant le taux de consommation de coke net par le rapport métal/coke chargé. En dernier lieu, nous avons vérifié nos calculs du taux de fusion en les comparant aux taux de fusion déterminésexpérimentalement à la fonderie. Dans la plupart des cas, même dans les fonderies qui utilisaient un bon contrôle du vent et de la charge, le taux de fusion calculé s'est avéré très différent du taux mesuré. Cette différence a varié d'un cubilot à l'autre, mais elle était plus prononcée pour les cubilots dont la coulée était de courte durée et pour les cubilots qui manifestaient, dans la composition des gaz de la cheminée, des conditions de fusion instables. La raison de cette inconsistance est fort simple. Le calcul du bilan des matériaux supposait que la hauteur et la quantité de lit de coke demeuraient constantes et que seulement la charge de coke était consommée; cependant, les lectures

obtenues des gaz de la cheminée indiquaient que dans la plupart des fonderies, l'hypothèse d'un lit de coke constant était inexacte et que le changement réel dans le lit de coke devait être considéré lors du calcul du bilan des matériaux. Cette variation peut facilement être déterminée lorsqu'on pèse les chutes à la fin de la fusion et qu'on les compare au poids de la charge de coke initiale. Supposons une réduction de la hauteur du lit de coke, ainsi que la tendance l'indique, les corrélations précédentes 1) et 2) changent pour justifier le lit de coke consommé comme suit:

1a) TAUX DE CONSOMMATION DU COKE DE LA CHARGE + TAUX DE CONSOMMATION DU LIT DE COKE = TAUX DE CONSOMMATION DE COKE NET

1b) TAUX DE CONSOMMATION DU COKE DE LA CHARGE = TAUX DE CONSOMMATION DE COKE NET - TAUX DE CONSOMMATION DU LIT DE COKE

2a) RAPPORT METAL:COKE REEL = CHARGE METTALIQUE - (COKE DE LA CHARGE + LIT DE COKE CONSOMME)

En utilisant un taux de consommation plus bas de la charge de coke et un rapport métal/coke réel comme défini à 1b) et à 2a), les taux de fusion calculés et mesurés se sont avérés en accord pour la plupart des fonderies.

Bien que le bilan calorifique modifé ait bien démontré la réaction instable des cubilots opérant pour des périodes courtes, il n'en était pas de même pour les cubilots opérant pour de longues périodes. Considérons le cas d'un cubilot sans garnissage refroidi à l'eau dont on vidait les chutes une fois

par semaine. La figure 5 nous montre la tendance journalière dans la composition des gaz d'échappement, l'instabilité des conditions de fusion de ce cubilot et la diminution de la hauteur du lit de coke tout au long de la fusion. Bien sûr, attendre toute la semaine pour évaluer les chutes de coke et pour déterminer le bilan des matériaux moyens réels ne clarifiers que très peu les comportements journaliers instables. D'un autre côté, si nous laissons de côté la variation du lit de coke et retournons au bilan calorifique conventionnel, nous obtenons des résultats nettement en désaccord avec la réalité. Par exemple, le taux de fusion calculé diminuait tout au long de la fusion, tandis que les pertes calculées de chaleur par la paroi augmentaient.

Le problème de quantifier la variation de la hauteur du lit de coke pour permettre de calculer les bilans réels de chaleur et de matériaux pour les différentes étapes de la fusion fut résolu par deux méthodes indépendantes qui amenèrent des résultats semblables. Dans la première méthode, les pertes de chaleur par la paroi, qui selon les calculs augmentaient de 9 à 17% durant la fusion, fut établi comme étant constante à 13%. La chaleur accumulée dans la fonte liquide et le laitier fut obtenue en enlevant les pertes de chaleur par la paroi et dans les gaz de la cheminée de l'apport de chaleur initial. Un nouveau taux de fusion fut calculé et à l'aide du rapport de la charge métal:coke, un taux de consommation de la charge de coke fut obtenu. Le taux de consommation du lit de coke fut déterminé en soustrayant le taux de consommation de la charge de

coke du taux de consommation de coke net calculé (corrélation 2a).

Dans la deuxième méthode, les conditions de fusion à la fin de la journée furent utilisées comme norme et nous avons supposé que la chaleur latente "supplémentaire" dans les gaz d'échappement lors d'étapes précédentes durant la fusion représentait la combustion du lit de coke. Si l'on considère que la température demeurait constante durant toute la fusion, nous pouvons supposer que notre hypothèse est raisonnable. Le taux de production de la chaleur latente supplémentaire fut déterminé lors de chaque étape de la fusion et le taux de consommation du lit de coke fut calculé. Basé sur la corrélation 2a), le taux de consommation de la charge de coke fut déterminé et combiné au rapport de la charge métal:coke afin d'établir le taux de fusion. Ces deux méthodes utilisées pour quantifier les taux de consommation du lit de coke ont produit des résultats non seulement semblables à 5% près mais en accord avec les taux de fusion mesurés, qui augmentèrent tout au long de la fusion.

Appendice B. - Résumé du rendement de la fusion, de la conception et des caractéristiques opératoires.

Fond. No.	R.F. %	Chaleur latente %	Chaleur sensible %	Pertes (paroi) %	Temp. de la fonte au bec °C °F	Carbone équiv. initial (final)	Conditions de la scorie B	% FeO	Durée heures	Dia. de la zone de fusion du cubilot cm (po.)	Hauteur du cubilot cm (po.)	Genre de Coulée	Contrôle	Accessoires	Niv	Vélocité spéc. du vent Nm /m /min (Spi/pi/min)	Taux de fusion spéc. tonnes/h/m (tonnes/h/pi)
5	45.5	29.1	7.0	12.8	1515 (2760)	1.80 (3.10)	N.D.	N.D.	8.7	152 (60)	457 (180)	C	1,2,3	4,6	54	66 (215)	6.6 (0.67)
2	46.5	32.4	8.6	2.6	1507 (2745)	N.D.	0.61	1.5	8.0	122 (48)	561 (221)	C	1,2,3	5,6	50	85 (278)	9.1 (0.93)
15	34.4	34.6	17.0	8.4	1524 (2775)	N.D.	0.66	0.8	12.1	130 (51)	414 (161)	C	1,2,3	5	47	103 (138)	8.1 (0.85)
27	28.2	45.0	10.1	12.2	1560 (2840)	4.05 (4.35)	0.85	0.8	11.5	198 (78)	640 (252)	C	1,2,3	4,5,7	28	61 (205)	5.1 (0.52)
4	11.0	21.6	5.9	25.1	1482 (2700)	4.10 (4.00)	0.79	1.4	7.2	152 (60)	701 (276)	C	1,2,3	4,7	66	75 (247)	6.4 (0.65)
19	35.7	26.6	11.5	10.2	1504 (2740)	1.95 (4.05)	0.81	1.5	16.0	117 (54)	670 (264)	C	1,2,3	4,5,7	41	82 (270)	7.0 (0.72)
15a	12.5	34.0	14.4	13.6	1510 (2750)	N.D.	0.66	0.8	11.0	130 (51)	414 (161)	C	1,2,3	5	48	127 (418)	9.3 (0.95)
6	28.2	13.2	18.1	21.0	1482 (2700)	N.D.	N.D.	N.D.	5.5	76 (30)	343 (135)	C	1	5	80	119 (390)	9.3 (0.95)
9	17.4	21.1	10.8	20.0	1482 (2700)	4.45 (4.35)	0.75	2.6	1.3	91 (32)	488 (192)	C	1,2,3		65	128 (420)	9.6 (0.98)
14	16.0	21.6	18.7	16.2	1488 (2710)	4.35 (4.15)	0.60	2.4	6.5	81 (32)	472 (186)	C	1,2,3		65	120 (395)	8.6 (0.88)
21	10.4	29.4	14.8	14.6	1513 (2755)	3.95 (4.15)	0.51	1.0	4.0	97 (38)	559 (220)	C	1,2,3		56	77 (252)	4.8 (0.49)
28	26.1	43.5	11.1	13.7	1538 (2800)	3.90 (3.80)	N.D.	N.D.	8.1	84 (33)	546 (215)	C	1,2,3		17	125 (410)	7.2 (0.74)
16	35.4	27.5	10.6	21.3	1471 (2680)	3.85 (4.05)	0.62	1.2	3.4	107 (42)	518 (204)	C	1,2,3	5	60	114 (375)	8.6 (0.88)
22	30.7	37.4	6.6	19.4	1491 (2715)	4.45 (4.25)	0.75	1.0	7.9	91 (36)	503 (198)	C	2,3		44	76 (249)	5.3 (0.54)
29	21.4	35.6	11.5	21.6	1560 (2840)	4.25 (4.15)	0.66	2.0	3.1	86 (43)	384 (151)	C	1		48	101 (330)	4.4 (0.45)
24	26.8	42.3	9.1	16.7	1493 (2720)	4.20 (4.10)	0.44	3.4	3.7	102 (40)	437 (172)	C	2,3		38	74 (241)	4.5 (0.46)
22	1..6	35.5	3.7	17.6	1515 (2760)	N.D.	0.59	1.6	2.1	6. (32)	N.D.	C	1,2,3		47	96 (314)	6.8 (0.69)
10	12.1	17.7	21.3	22.6	1461 (2665)	4.45 (4.35)	0.14	7.5	1.6	91 (36)	485 (191)	-	2,3		74	102 (334)	6.1 (0.62)
26	28.9	28.9	19.6	17.1	1477 (2690)	4.35 (4.25)	0.67	1.0	3.0	76 (30)	259 (102)	I	2,3		57	81 (265)	4.8 (0.49)
12	26.9	19.7	22.8	26.9	1482 (2700)	4.60 (4.50)	0.66	4.6	1.6	94 (37)	320 (126)	C	1,2,3		71	115 (444)	6.9 (0.70)
8	26.1	33.5	19.5	18.5	1482 (2700)	4.15 (4.05)	0.05	19.0	0.7	71 (28)	455 (179)	I	2,3		51	129 (422)	7.0 (0.72)
7	11.8	22.6	19.2	20.4	1446 (2635)	4.50 (4.40)	0.71	2.8	2.1	91 (36)	323 (127)	I	2,3	5	66	98 (321)	6.9 (0.71)
11	25.7	22.8	24.1	21.7	1468 (2675)	4.15 (4.05)	0.58	7.0	1.0	31 (12)	472 (186)	I	2,3		67	92 (302)	4.6 (0.47)
1	26.0	29.6	10.1	27.1	1454 (2650)	4.95 (4.65)	0.51	5.7	1.2	76 (30)	366 (144)	I	2,3		55	115 (376)	6.5 (0.66)
13a	27.6	34.2	19.3	16.5	1449 (2640)	4.40 (4.30)	0.14	7.5	1.8	91 (36)	485 (191)	I	2,3		50	94 (308)	5.8 (0.59)
20	29.1	30.4	12.1	20.7	1440 (2625)	4.20 (3.90)	0.88	5.4	1.7	91 (36)	357 (100)	I	1,2,3	5	55	92 (300)	6.2 (0.61)
1	21.2	32.4	24.1	16.9	1474 (2685)	4.55 (4.45)	0.61	1.5	1.1	86 (34)	569 (224)	C	2,3		55	129 (422)	5.8 (0.59)
17	28.7	30.4	9.8	25.3	1411 (2575)	4.05 (3.95)	0.21	8.7	4.2	61 (24)	419 (171)	I	1		55	88 (287)	5.4 (0.55)
18	25.7	11.6	31.9	29.3	1400 (2550)	4.20 (4.00)	0.15	10.0	1.0	76 (30)	341 (135)	I	-		81	118 (387)	5.6 (0.57)
11	28.1	16.7	16.1	31.2	1380 (2515)	3.95 (3.85)	0.47	7.9	1.1	86 (34)	171 (146)	I	1		76	80 (261)	4.4 (0.45)
25	10.7	16.8	26.9	24.7	1385 (2525)	N.D. (4.25)	0.01	12.4	1.1	86 (34)	259 (102)	I	2,3		47	127 (415)	1.0 (0.11)
30	3.2	60.3	17.0	12.4	1385 (2525)	N.D. (4.20)	0.42	2.1	2.0	76 (30)	198 (78)	I			14	85 (277)	2.2 (0.22)

Légende: 1. Contrôle du vent; 2. Poids de la charge métallique; 3. poids ou volume du coke; 4. vent chaud; 5. Enrichissement par l'oxygène 6. vent divisé; 7. sans garnissage, refroidi à l'eau

Se = Rapport de combustion = (% CO_2) ÷ (% CO_2 + CO)

B = Rapport de basicité = (% MgO + % CaO) ÷ (% SiO_2)

C = Coulée continue I = coulée à intervalles